



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

TRENDY VE VÝVOJI JADERNÉHO PALIVA

TRENDS IN NUCLEAR FUEL DEVELOPMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Gergő Takács

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Štěpán Foral

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav elektroenergetiky

Student: Gergő Takács

Ročník: 3

ID: 203356

Akademický rok:

2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Trendy ve vývoji jaderného paliva

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište funkce palivového souboru a nároky na něj kladené.
2. Popište standardní palivové soubory východních a západních typů reaktorů.
3. Popište aktuální trendy ve vývoji
 - matrice paliva,
 - pokrytí paliva,
 - konstrukce palivových souborů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle doporučení vedoucího práce

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 10.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Štěpán Foral

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního program

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení částí druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 616 00 / Brno

Bibliografická citace práce:

TAKÁCS, Gergő. *Trendy ve vývoji jaderného paliva*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/127277>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav elektroenergetiky. Vedoucí práce Štěpán Foral.

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Trendy ve vývoji jaderného paliva jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

V Brně dne: 08.06.2020

.....

POĎAKOVANIE:

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Štěpanovi Foralovi za účinnú metodickú, pedagogickú, odbornú pomoc, trpezlivosť a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

Brno: 08.06.2020

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Cieľom bakalárskej práce je oboznámiť čitateľa s rozdielmi medzi tlakovodnými reaktormi východného a západného typu. Opisuje rozdiely v používaných materiáloch v pokrytí a opisuje koncepcie jednotlivých palivových súborov. Venuje časť pre rôzne deje ktoré sa počas štepenej reakcie stanú medzi palivom a pokrytím. Ďalej dáva prehľad o tom, čím sa zaoberajú najväčšie spoločnosti, opisuje budúce trendy vo vývoji jadrového paliva.

KLÚČOVE SLOVÁ: VVER, PWR, palivový súbor, pokrytie, nároky na jadrové palivo, ATF.

ABSTRACT

The aim of the bachelor thesis is to acquaint the reader with the differences between pressurized water reactors of the eastern and western type. It describes the differences in the materials used in the cladding and describes the concepts of individual fuel assemblies. It devotes a section to the various events that occur between the fuel and the cladding during the fission reaction. It also gives an overview of what the largest companies are dealing with, describes future trends in the development of nuclear fuel.

KEY WORDS: VVER, PWR, fuel assembly, cladding material, requirements for nuclear fuel, ATF

OBSAH

ZOZNAM OBRÁZKOV.....	8
ZOZNAM TABULEK	9
ZOZNAM SYMBOLOV A ZKRATOK	10
1 ÚVOD.....	11
2 JADROVÉ ELEKTRÁRNE S REAKTORMI CHLADENÝMI TLAKOVOU VODOU.....	12
2.1 KONCEPT TLAKOVODNÝCH REAKTOROV.....	12
2.2 HISTÓRIA JADROVEJ ELEKTRÁRNE S REAKTORMI CHLADENÝMI TLAKOVOU VODOU	13
2.3 ZÁPADNÁ A VÝCHODNÁ KONCEPCIA REAKTOROV	14
2.3.1 REAKTOROVÁ NÁDOBA PRE REAKTORY CHLADENÉ TLAKOVOU VODOU	15
2.3.2 AKTÍVNA ZÓNA REAKTOROV CHLADENÉ TLAKOVOU VODOU	16
3 JADROVÉ PALIVO	18
3.1 PALIVOVÉ TABLETY	19
3.2 PALIVOVÉ TYČE	19
3.3 POKRYTIE	20
3.3.1 ZLIATINY ZIRKÓNIA	21
3.4 PALIVOVÝ SÚBOR.....	22
3.4.1 PALIVOVÝ SÚBOR PRE REAKTORY VVER	22
3.4.2 PALIVOVÝ SÚBOR PRE REAKTORY PWR.....	25
3.5 VÝMENA PALIVA	26
3.6 EFEKTÍVNOSŤ PALIVA	27
3.7 VÝVOJ PALIVA.....	28
3.7.1 PALIVO PRVEJ GENERÁCIE	28
3.7.2 PALIVO DRUHEJ GENERÁCIE	29
3.7.3 PALIVO TRETEJ GENERÁCIE	31
4 NÁROKY Kladené na jadrové palivo.....	32
4.1 DEJE V JADROVOM PALIVE.....	32
4.1.1 ROZPÍNANIE PALIVA	32
4.1.2 ZAHUSŤOVANIE PALIVA.....	33
4.1.3 RAST PALIVOVÉHO ZRNÁ.....	33
4.1.4 NAPÚCHANIE OBJEMU PALIVA (SWELLING).....	33
4.1.5 TVRDNUTIE, KREHNUTIE A KORÓZIA POKRYTIE	34
4.1.6 VYDÚVANIE POKRYTIA.....	34
4.1.7 MECHANICKÉ INTERAKCIE MEDZI PALIVOM A POKRYTÍM	34
4.1.8 CHEMICKÉ INTERAKCIE MEDZI PALIVOM A POKRYTÍM	34
4.1.9 STENČOVANIE POKRYTIA - KORÓZIA, ERÓZIE A ROZPÚŠŤANIE POKRYTIA.....	34
4.1.10 ÚNAVA POKRYTIA.....	35
4.2 LIMITNÉ PODMIENKY PREVÁDZKOVÝCH REŽIMOV REAKTORA.....	35
4.2.1 PODMIENKA NETAVENIA URÁNOVÉHO JADRA V PALIVOVEJ TYČI.....	35
4.2.2 PODMIENKA NEPREKROČENIA HRANIČNEJ TEPLoty ZIRKÓNIOVÉHO POKRYTIA	35

4.2.3 PODMIENKA NEPREVYŠOVANIA VÁHOVÉHO MNOŽSTVA PARY NA VÝSTUPE Z PALIVOVÉHO SÚBORU	35
4.2.4 PODMIENKA NEPRIEPUSTNOSTI KRÍZA VARU.....	36
5 TRENDY VO VÝVOJI JADROVÉHO PALIVA.....	36
5.1 SPOLOČNOSŤ WHESTINGHOUSE	36
5.2 SPOLOČNOSŤ FRAMATOME.....	37
5.3 SPOLOČNOSŤ ROSATOM.....	38
5.4 SPOLOČNOSŤ GE HITACHI S GNF.....	38
6 ZÁVER.....	39
POUŽITÁ LITERATURA	40

ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 2-1 Dvojokruhová schéma [2]</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 2-2 Umiestnenie reaktorovej nádoby v Shippingporte.....</i>	<i>13</i>
<i>Obr. 2-3 Reaktor jadrovej elektrárne typu PWR [4].....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2-4 Reaktorová nádoba jadrovej elektrárne typu VVER – 440 a VVER – 1000 [2]</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2-5 Aktivná zóna jadrovej elektrárne typu PWR [6]</i>	<i>16</i>
<i>Obr. 2-6 Aktivná zóna jadrovej elektrárne typu VVER [7]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2-7 Aktivná zóna jadrovej elektrárne VVER s rozložením [2].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2-8 Palivový súbor reaktoru typu VVER [2].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 3-1 Konštrukcia palivovej tyče plnenej s UO₂ [13]</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3-2 Znázornenie procesu fabrikácie jadrového paliva [15]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-3 Grafické porovnanie paliva TVSA [9].....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 3-4 Palivový súbor Phase IX [10].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 3-5 Palivový súbor pre PWR [12]</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 3-6 Schéma paliva 1.generácie s priemerným obohatením 3,82% [21].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3-7 Schéma paliva Gd-1 obohatenie ²³⁵U 4,38% [21]</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3-8 Schéma paliva Gd-2 obohatenie ²³⁵U 4,25% [21]</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3-9 Schéma paliva Gd-2+ obohatenie ²³⁵U 4,38% [21].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3-10 Schéma paliva Gd-2M, [21]</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3-11 Schéma paliva Gd-2M+ obohatenie ²³⁵U 4,76% [21]</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4-1 Schéma idealizovanej zdeformovanej palivovej pelety [22].....</i>	<i>33</i>

ZOZNAM TABULEK

<i>Tab. 3-1 Prvky s obsahom ktoré tvoria zliatinu Zircaloy – 4</i>	21
<i>Tab. 3-2 Prvky s obsahom ktoré tvoria zliatinu ZIRLO</i>	21
<i>Tab. 3-3 Prvky s obsahom ktoré tvoria zliatinu Zr + 1% Nb</i>	21
<i>Tab. 3-4 Vybrané parametre palivového súboru TVSA-T</i>	23
<i>Tab. 3-5 Rozdiely v parametroch medzi súbormi TVSA [9]</i>	23
<i>Tab. 3-6 Vybrané parametre paliva RFA</i>	25
<i>Tab. 3-7 Porovnanie vlastností profilovaného a neprofilovaného paliva</i>	28
<i>Tab. 3-8 Základné rozdiely medzi palivom druhej a tretej generácie</i>	32
<i>Tab. 5-1 Prvky s obsahom ktoré tvoria zliatinu M5</i>	37

ZOZNAM SYMBOLOV A ZKRATOK

PWR		Pressurized Water Reactor – Tlakovodný reaktor
VVER		Vodo-Vodjanoj Energetičeskij Reaktor – Tlakovodný reaktor východného typu
RBMK		Reaktor bolšoj Moščnosti Kanalnyj – Varný grafitový reaktor chladené ľahkou vodou
TVEL		Ruská spoločnosť vyrábajúca jadrové palivo
Tvel		Palivová tyč neobsahujúci absorbátor
Tveg		Palivová tyč obsahujúci absorbátor
ATF		Accident Tolerant Fuel
LOCA		Loss-of-coolant accident (havária pri ktorej sa stráca chladiivo)
UO ₂		Oxid uraničitý
Ω		vodo-uránový pomer
V _{mod}	(l)	Objem moderátoru
V _{UO2}	(l)	Objem paliva

1 ÚVOD

Vývoj ľudskej spoločnosti a priemyslu súvisí so zväčšujúcou sa spotrebou na elektrickej energii. Intenzívne sa využívajú primárne zdroje, s ktorými spôsobujeme negatívne vplyvy na životné prostredie. Ak prirovnáme Zem k jablku atmosféra nebude hrubšia ako šupka jablka. Emisie rôznych toxických plynov do tejto tenkej vrstvy, ako napríklad CO₂ môžu mať za následok globálnu zmenu podnebia. Veľká koncentrácia oxidu uhličitého okolo Zeme nedovolí aby sa všetky vyžarované energie mohli dostať do vesmíru a s tým aby sa klíma oteplila. Vďaka emisiám skleníkových plynov sa do roku 2050 môže teplota Zeme zvýšiť o 1 - 5 °C. Od roku 1960 vzrástla globálna koncentrácia oxidu uhličitého z 316 ppm (parts per million) na 450 podľa co2.earth. Riešením na tento problém by bola jadrová energia.

Jadrové elektrárne sú zdroje energie ktoré vytvárajú minimum odpadu v porovnaní s ostatnými elektrárnami. Ich produkcia výkonu nezávisí na počasi, a môžu vytvárať dostatočný výkon k pokrytiu širokej spotreby. Okrem toho jadrová energetika sa považuje za jednu z najbezpečnejších foriem výroby elektrickej energie, ale ako sa už v histórii ukázalo, havárie môžu spôsobiť obrovské škody, ktorých následky sú možné vidieť aj za stovky rokov.

Jadrová energetika sa začala vyvíjať od roku 1957, keď postavili prvú jadrovú elektráreň v USA.. Vynájdenie atómovej bomby prispelo k rýchlejšiemu rozvoju jadrovej energie. Rozvoj sa začal a ešte stále trvá. Vďaka neustálenému vývoju v oblasti jadrového paliva je možné zvýšiť získanú energiu a zvyšovať bezpečnosť prevádzky.

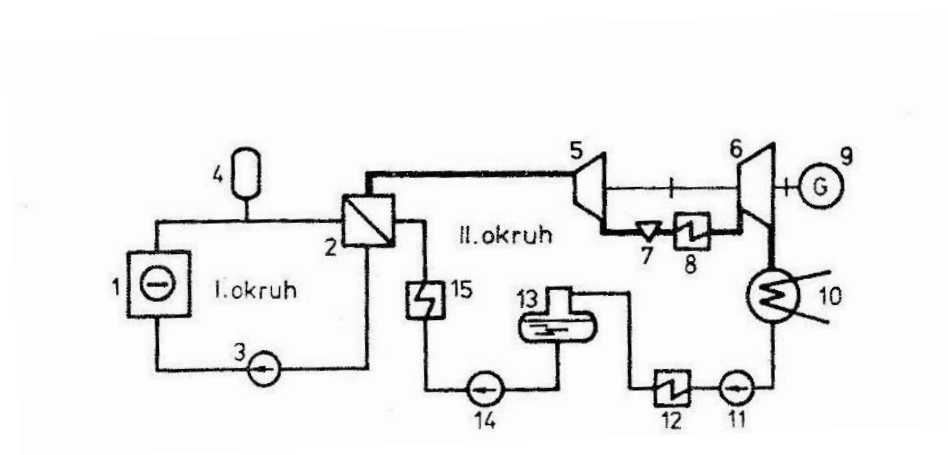
2 JADROVÉ ELEKTRÁRNE S REAKTORMI CHLADENÝMI TLAKOVOU VODOU

Táto kapitola popisuje jadrové elektrárne s reaktormi chladenými tlakovou vodou. Vychádza hlavne zo zdroja [1] a [2]. V tomto zdroji sa nachádza ucelená informácia o tlakovodných reaktoroch, a preto bol zvolený ako hlavný zdroj. V tejto kapitole je vysvetlená štruktúra reaktorov, ich rozdelenie a systémy nachádzajúce sa v reaktoroch.

2.1 Koncept tlakovodných reaktorov

Tlakovodné reaktory najprv slúžili na pohon atomových ponoriek. Prvá prototypová jadrová elektráreň bola postavená a prevádzkovaná v USA v roku 1957 – Shippingport.

Reaktory nazývame tlakovodnými v prípade, keď je obyčajná voda používaná ako moderátor a aj ako chladivo. Tieto reaktory sú prevádzkované tak, že nedochádza k varu vody v aktívnej zóne. Svoje meno dostali z anglického slovného spojenia PWR (pressurized light-water-moderated and cooled reactor). Jadrové elektrárne s tlakovodným reaktorom majú dvojokruhovou schému, ako je možné vidieť na Obr. 2-1.



Obr. 2-1 Dvojokruhová schéma [2]

1-Reaktor, 2-parný generátor, 3-hlavné cirkulačné čerpadlo, 4-kompenzátor objemu, 5,6 – vysokotlaková/nízkotlaková časť turbíny, 7 – odlučovač vlhkosti, 8 – prehrievač pary, 9-elektrický generátor, 10-kondenzátor, 11-kondenzátne čerpadlo, 12,15-nízkotlakový/vysokotlakový regeneračný ohrievač napájacej vody, 13-odplyňovač, 14-napájacie čerpadlo

Jadrové elektrárne tohoto typu majú najviac spoločných znakov s klasickou elektrárnou a ich prednosťou je nízka cena vyrobenej energie.

K najväčším nevýhodám jadrových reaktorov patrí nízka účinnosť tepelného obehu (okolo 30% až 34%), spôsobená nízkymi parametrami sýtej a sekundárnej pary. Tieto reaktory majú veľkú požiadavku na štepny materiál, ktorá je daná absorpciou neutrónov v ľahkovodnom chladiči a v konštrukčných materiáloch aktívnej zóny reaktora.

Referencie [1] a [2] uvádzajú, že medzi hlavné charakteristické znaky tlakovodného reaktora patria:

- *palivo U (uran) je obohatené a požívané vo forme UO_2*
- *aktívna zóna je usporiadaná kompaktne;*
- *riadenie reaktora absorbčnými tyčami zasúvaným zhora*
- *dobrá znalosť tepelných a fyzikálnych vlastností a technológie vody;*
- *pomerne jednoduchý chladiaci systém reaktora;*
- *problémy korózie a erózie v primárnom okruhu (rastú s tlakom, teplotou a rýchlosťou vody);*
- *vysoká stabilita reaktora daná veľkou hodnotou záporného teplotného súčiniteľa reaktivity;*
- *požiadavky na systém zabezpečenia (ochranná obálka).*

2.2 História jadrovej elektrárne s reaktormi chladenými tlakovou vodou

Tlakovodné reaktory najprv slúžili na pohon atomových ponoriek. Prvá používali pre atomovú ponorku USS Nautilus v roku 1954. Prvá prototypová jadrová elektráreň bola postavená a prevádzkovaná v USA v roku 1957 – Shippingport. Jej maximálny výkon bol 68MWe. Ako chladiivo používali obyčajnú vodu, a ako palivo zvolili čiastočne prírodný urán a čiastočne urán obohatený na 15%. V roku 1977 vyskúšali nové tabletky, ktoré sa skladali z ThO_2 a ^{233}U , obohatení 5-6%. Elektráreň bola v prevádzke do roku 1982. [3]

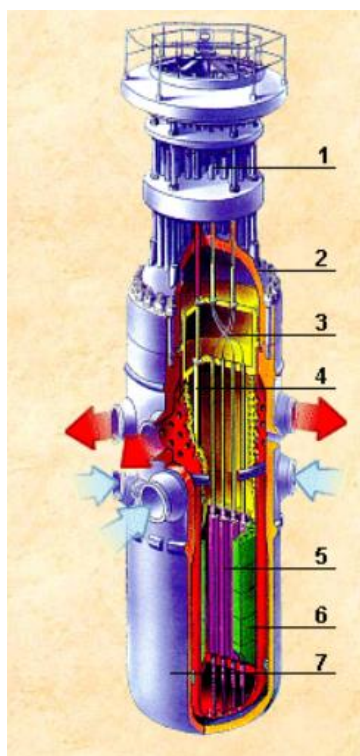


Obr. 2-2 Umiestnenie reaktorovej nádoby v Shippingporte

Tlakovodné reaktory VVER sa často nazývajú ako tlakovodné reaktory východného typu. Skratka VVER vychádza zo sovietského slovného spojenia : vodo-vod'anoj energetičeskij reaktor. Prvý reaktor tohto typu sa začal prevádzkovať v roku 1964 v Novovoronežskej jadrovej elektrárni. Jej elektrický výkon bol 210MWe. Jej prevádzka nebola efektívna, lebo dosahovala účinnosť iba 27%. Fungovala do roku 1988. Tlakovodné reaktory východnej koncepcie je možné rozdeliť do troch skupín podľa veľkosti ich výkonu. Reaktory s elektrickým výkonom 365MW sú nazývané ako reaktory VVER prvej generácie. Začali svoju prevádzku v roku 1969 a odstavené boli v roku 1990. Postupne reaktory s výkonmi 440MW a 1000 MW tvoria druhú a tretiu generáciu. Prvý reaktor typu VVER-1000 bol postavený v roku 1981 tiež v Novovoroneži ale ani z ďaleka nebol dokonalý. Vylepšená verzia bola už VVER-1000 V-302 a V-320. [1]

2.3 Západná a východná koncepcia reaktorov

Základná súčasť jadrovej elektrárne je energetický reaktor, ktorý sa nachádza v primárnom okruhu jadrovej elektrárne. Na Obr. 2-3 je možné vidieť rez reaktoru západnej (=americkej) koncepcie. Najväčšie rozdiely medzi reaktormi východného a západného typu sú popísané v nasledujúcich podkapitolách.



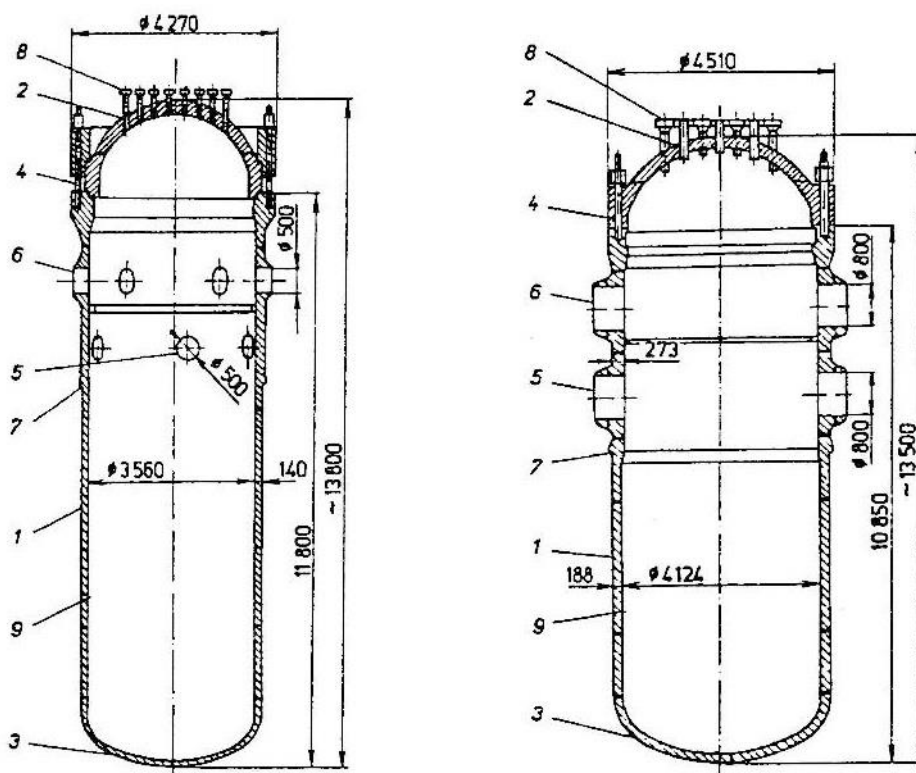
- 1 – pohon regulačného súboru
- 2 – veko tlakovej nádoby
- 3 – vývody pre meranie
- 4 – ochranné puzdro regulačnej tyče
- 5 – palivové kazety
- 6 – plášť aktívnej zóny
- 7 – reaktorová nádoba

Obr. 2-3 Reaktor jadrovej elektrárne typu PWR [4]

2.3.1 Reaktorová nádoba pre reaktory chladené tlakovou vodou

Reaktorovú nádobu pre reaktory PWR je možné rozdeliť na dve časti, hornú a dolnú časť. Nátrubky pre pripojenie pohonov regulačných tyčí sú zahrnuté v snímateľnom veku nádoby. Ako konštrukčný materiál nádoby je najčastejšie používaná nízkolegovaná uhlíková oceľ s vnútornou výstelkou z nehrdzavejúcej ocele. Tepelné tienenie je umiestnené medzi aktívnou zónou a nádobou, aby sa nedovolilo radiačné poškodenie nádoby. Hrdlá slúžiace na vstup a na výstup chladiacej vody sa nachádzajú v hornej časti nádoby. V prípade poruchy tyčí, chladiaca voda zaleje aktívnu zónu. Vstupnými hrdlami sa chladiaca voda najprv dostane do časti medzi aktívnou zónou a stenou nádoby a potom v spodnej časti sa prúd vody otáča a odvádza teplo z palivových tyčí. Po výstupe z aktívnej zóny odchádza chladiivo výstupnými hrdlami.

Reaktorová nádoba jadrovej elektrárne typu VVER v porovnaní s reaktorovými nádobami jadrovej elektrárne typu PWR má tri hlavné časti: valcové teleso tlakovej nádoby, poglobové veko a voľná príruha.



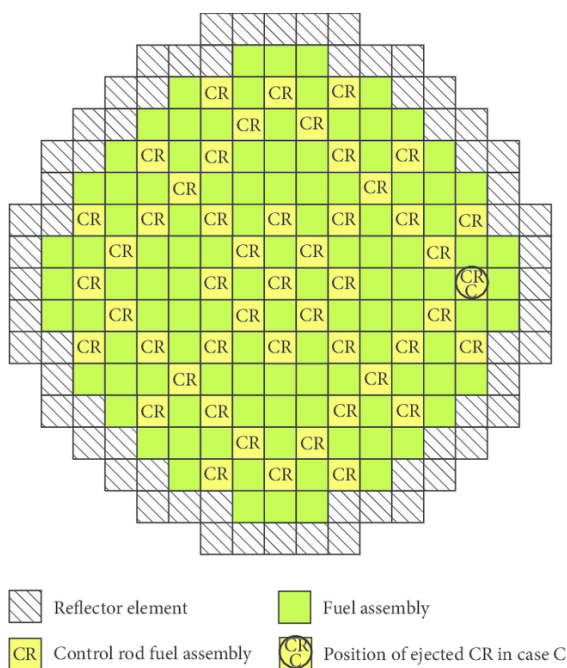
Obr. 2-4 Reaktorová nádoba jadrovej elektrárne typu VVER – 440 a VVER – 1000 [2]

- | |
|--|
| <p>1 – teleso nádoby, 2 – veko nádoby, 3 – dno nádoby, 4 – skrutkový spoj veka a telesa,
 5 – vstupné hrdlo, 6 – výstupné hrdlá, 7 – podpera tlakovej nádoby,
 8- nátrubky regulačnej tyče, 9 – antikoročná vrstva</p> |
|--|

Reaktorová nádoba typu VVER – 1000 je mohutnejšia ale spolu s horným blokom je skoro rovnako vysoká ako reaktorová nádoba typu VVER – 440. Rozmery jednotlivých reaktorových nádob je možné vidieť na Obr. 2-4. Teleso nádoby sa skladá z dna, z troch kovaných prstencov a z dvoch hrdlových prstencov s dvanástimi hrdlovými nátrubkami. 12 nátrubokov spolu tvorí 6 okruhov. Toto číslo pri reaktoroch VVER – 1000 je 4. Každý okruh má svoje obehové čerpadlo, čo je pri type 440 bezupchávkové, ale pri type 1000 je upchávkové. [2]

2.3.2 Aktívna zóna reaktorov chladené tlakovou vodou

Aktívna zóna sa nachádza v dolnej časti reaktorovej nádoby a skladá sa z vymeniteľných palivových súborov, ktoré sú umiestnené v troch približne valcových pásmach. Sú tu umiestnené pracovné palivové súbory a súbory HRK -havarijné, regulačné a kompenzačné. Pre plnenie svojej funkcie, sa pohybujú vo zvislom smere. Palivové súbory sú tvorené z palivových tyčí, každá z nich obsahuje rôzne obohatený štepny materiál. Používané palivo vyhorí (úroveň U^{235} sa znižuje), preto sa každý rok časť paliva nahradí čerstvým palivom. [1], [2], [5]

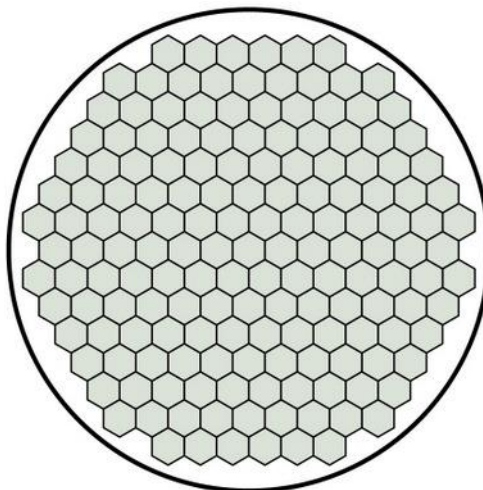


Obr. 2-5 Aktívna zóna jadrovej elektrárne typu PWR [6]

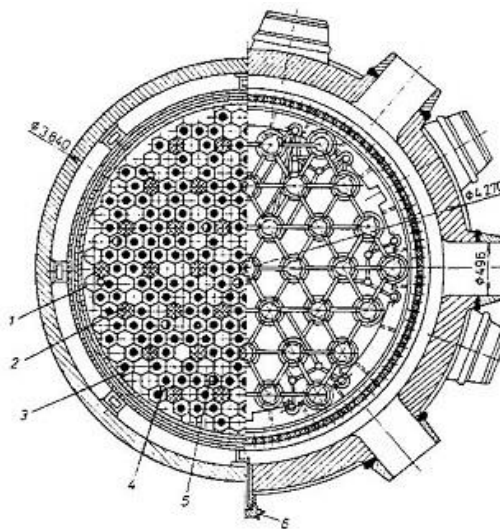
Aktívnu zónu jadrovej elektrárne typu VVER môžeme vidieť na Obr. 2-6. V aktívnej zóne sú umiestnené palivové súbory (1), regulačné orgány (2), kanály pre meranie: teploty (3), prietoku (4), neutrónového toku (5) ako je to vyznačené na Obr. 2-7. Pri jadrovej elektrárni typu VVER – 440 sa aktívna zóna skladá z 349 palivových súborov, z čoho 312 sú pevné, ďalšie 37 slúžia na funkciu regulácie. V prípade poruchy tieto tyče zaisťujú ochranu, regulujú a kompenzujú reaktivitu v zóne a práve preto sa môžu pohybovať v zóne vertikálne. Jednotlivé palivové súbory sa nachádzajú 147 mm od seba.

Aktívna zóna pri type VVER – 440 v porovnaní s typom VVER – 1000 je menšia. Kým pri type 1000 je priemer 3160 mm a výška 3630 mm, 440 má priemer 3 m a výšku 2,5 m.

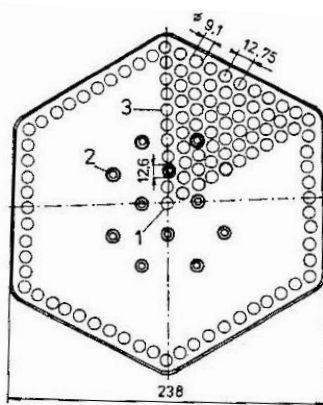
Hlavný rozdiel od tlakovodných reaktorov západnej koncepcie je v tom, že palivový súbor má šesťhranný tvar a palivové tyče sa nachádzajú v trojuholníkovej mriežke vo vzdialenosti 12,2 mm. Pri palivových súboroch VVER nosnú časť palivového súboru tvorí obálka šesťhranného tvaru, ktorá vymedzuje priestor pre prietok chladiva.



Obr. 2-6 Aktivná zóna jadrovej elektrárne typu VVER [7]



Obr. 2-7 Aktivná zóna jadrovej elektrárne VVER s rozložením [2]



Obr. 2-8 Palivový súbor reaktoru typu VVER [2]

Palivový súbor aktívnej zóny pri type VVER – 1000 obsahuje 163 palivových súborov. Má menší počet ako pri type VVER – 440, pri ktorom je toto číslo 312 (skoro dvojnásobok). Ale napriek tomu celkové množstvo paliva je pri tomto type väčšie o 66 tun. [1], [8]

3 JADROVÉ PALIVO

Oxid uraničitý je najbežnejším palivovým materiálom v energetických reaktoroch. Získanie oxidu uraničitého z vyťaženeho uránu trvá dlho. Uránová ruda sa ťaží klasickými povrchovými a hlbinnými metódami ťažby. Výtazok je potom drvený, mletý a chemicky upravovaný v spracovateľských závodoch na žiadanú formu. Jeho čistením, koncentráciou a vyzrážaním sa, získa uránový koncentrát, hnedý až žltý prášok, žltý koláč „yellowcake“. Žltý koláč je vlastne koncentrovaná zmes oxidov uránu. Vyžadovaná vysoká čistota pre jadrové palivo sa potom dosahuje filtrovaním. Konečný uránový dusičan (UN alebo UNH) obsahuje len zanedbateľné množstvo cudzích látok. Uránové dusičany sú potom konvertované do formy UO_2 a potom na UF_6 . Obohatenie je vo všeobecnosti separácia v plynnej fáze UF_6 . Využívané metódy sú:

- Difúzna
- Odstredivková
- Chemická
- Trysková.

Nasleduje spätná konverzia, z UF_6 získajú UO_2 . Konverzia má 2 možnosti:

- suchá re-konverzia
- mokrá re-konverzia.

Pri mokrom spracovaní vznikajú častice prášku UO_2 vo forme suspenzie, pri suchom spracovaní v plynnej fáze vo forme aerosóly. Z finančných a ekonomických dôvodov suchá konverzia je výhodnejšia, lebo vznikajúci odpad v porovnaní s mokrými spôsobmi výroby je veľmi malý.

UO₂ má výhody vysokej teplotnej stability a primeranej odolnosti proti žiareniu. Má tiež vysokú teplotu topenia. Oxid uraníčitý je okrem toho chemicky odolný voči pôsobeniu horúcej vody. Táto vlastnosť ho robí atraktívnym pre použitie vo vodou chladených reaktoroch, kde by následky poruchy plášťa mohli byť katastrofálne, ak by palivový materiál reagoval ľahko s vodou pri existujúcej vysokej teplote. Medzi ďalšími výhodami tohto materiálu pre palivo je jeho schopnosť udržať veľkú priepasť štiepných plynov, pokiaľ teplota nepresiahne približne 1000 °C. Hlavnou nevýhodou oxidu uraníčitého ako paliva je jeho nízka tepelná vodivosť. [2], [13], [14]

3.1 Palivové tablety

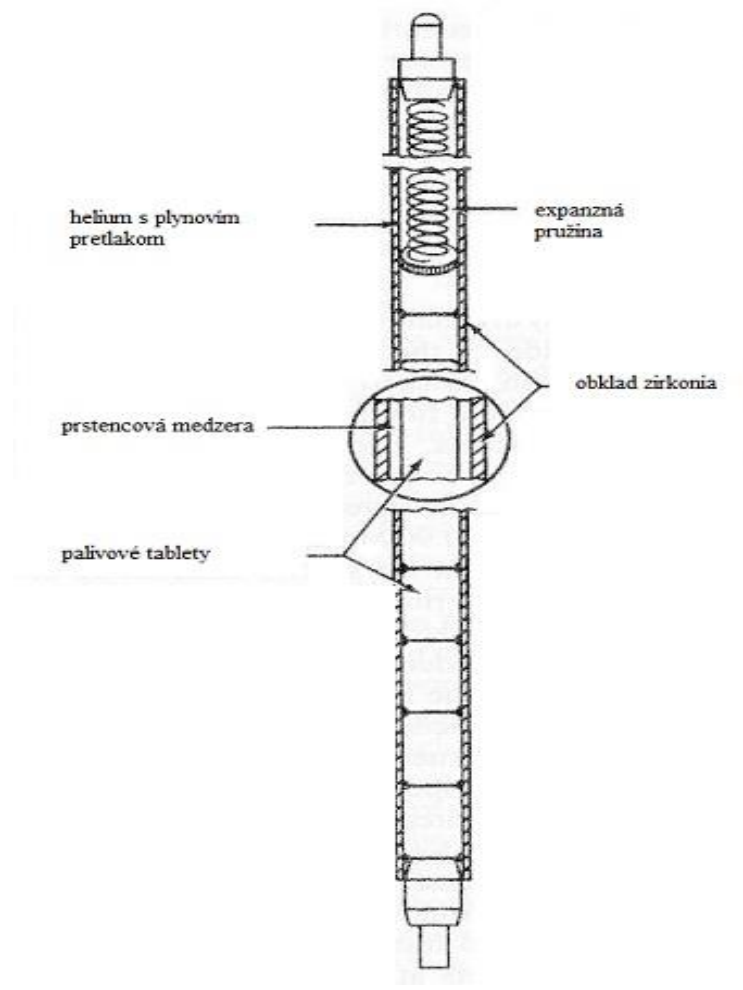
Pri výrobe palivovej tablety sa oxid uraníčitý melie na jemný prášok a lisuje sa za studena do malých valcovitých peliet s hustotou medzi 5,5 až 6,43 g/cm³. Ich hustota závisí hlavne od kvality vstupnej suroviny a veľkosti formy. Pelety sa potom spekajú v neutrálnej alebo redukčnej atmosfére, aby sa zabránilo absorpcii kyslíka, pri teplote asi 1700 °C, aby sa zvýšila ich hustota. Vysoká hustota je dôležitá z niekoľkých dôvodov:

- zvýšenie hustoty znamená zvýšenie tepelnej vodivosti,
- zvyšuje sa počet atómov uránu na jednotku objemu,
- zlepšuje sa zadržiavanie štiepných produktov.
- palivo je odolnejšie voči zahusťovaniu počas ožarovania.

Výška palivových tabliet je medzi 10 mm až 30 mm a uprostred majú otvor s priemerom 1,4 mm až 1,6 mm aby bolo možné znížovanie tepelného namáhania paliva. Ako to už v predchádzajúcej časti bolo napísané, UO₂ má malú tepelnú vodivosť, takže tyče sa prevádzkujú pri vysokých teplotách až 2500 °C. Po výrobe je celková výška palivovej tyče 2,42 m, ale vplyvom objemového narastania môže byť jej prevádzková výška až 2,48 m. Zvyšovanie objemu je spôsobené štepnými produktmi. Obal palivových tabliet je vyrobený zo zliatiny zirkónia a nióbu, viz. kapitolu 3.3. [2] [13]

3.2 Palivové tyče

Palivo vo forme valcovej tablety je hermeticky zatvorené do jednotlivých tyčí. Konštrukcia palivovej tyče je znázornená na Obr. 3-1. Malá prstencová medzera medzi palivovými peletami a plášťom obsahuje plyn hélia s pretlakom 300kPa až 700 kPa. Na zlepšenie vlastností prenosu tepla. Každá peleta obsahuje 1,06 kg UO₂. Z toho urán má hmotnosť asi 0,93 kg, takže celková hmotnosť uránu je okolo 42 ton v palivovom súbore. Aby sa palivové tablety nemohli pohybovať voľne vo vnútri, sú umiestnené v hornej časti tyče pružiny. Pružné pružiny s dištančnou mriežkou držia palivovú tyč v požadovanej polohe. Potom je priestor vyplnený héliom a nakoniec je utesnený koncovým viečkom. Spojením niekoľkých takýchto naplnených prútikov s ďalšími konštrukčnými prvkami vzniká palivová kazeta. [1], [2], [13]



Obr. 3-1 Konštrukcia palivovej tyče plnenej s UO_2 [13]

3.3 Pokrytie

Pre navrhovanie jadrových reaktorov sa používajú rôzne materiály. Niektoré materiály, majú nižšie prierezy zachytávania termálnych neutrónov naopak, niektoré iné napríklad absorbéry, tieniace materiály, by mali mať značné prierezy zachytenia neutrónov. Pokrytie má svoju hlavnú úlohu v tom, aby bránilo palivo pred účinkami prostredia v ktorom sa nachádza. Aby mohlo plniť svoje funkcie musí mať rôzne typické vlastnosti. Predovšetkým musí vydržať vysoké teploty bez poškodenia, ďalej nemôže vstúpiť do reakcie s aktívnymi látkami, ktoré sa nachádzajú v palivovej tyči, prípadne v chladiu. Potrebuje vysokú tepelnú vodivosť, aby bolo schopné prenášať teplo z paliva do chladiu. Pre pokrytie sú používané kovy, ale zriedkavo v čistom stave. Väčšinou sa používajú zliatiny (Al, Mg, Zr, Ni, Nb) a ocele. Používanie konkrétneho materiálu závisí na type reaktoru a použitého paliva. [17]

3.3.1 Zliatiny zirkónia

Zirkónium je kov s vysokou teplotou topenia (1850 °C). Jeho tepelný absorpčný prierez neutrónov je menší ako $1 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$. Zirkónium je dobre kompatibilné s jadrovým palivom a vyznačuje sa vysokými spracovateľskými vlastnosťami. Tepelná vodivosť zirkónia je blízka vodivosti nehrdzavejúcej ocele. Má vysokú odolnosť proti korózii a preto je vhodné pre materiál pokrytia pri reaktoroch chladených vodou. Nevýhody zirkónia sú nízka pevnosť a nízka tepelná odolnosť, ktorú je možné eliminovať napríklad legovaním nióбом. [17]

3.3.1.1 Zliatiny zirkónia pre PWR

Zliatiny zirkónia s cínom sa používajú ako pokrytie palivových súborov BWR a PWR. Maximálna teplota, pri ktorej sa zliatiny zirkónia môžu používať pri vodou chladených reaktoroch, závisí od ich odolnosti proti korózii. Zliatiny typu Zircalloy-4, v ktorých cín je základným zlučovacím prvkom (1,5%), sa používajú na pokrytie pohonných hmôt, vodivých rúr a dištančných mriežok. V súčasnej dobe Zircalloy-4 sa nepoužíva tak často. Boli vynájdené nové zliatiny, ktoré obsahujú menšie množstvo cínu, ako napríklad ZIRLO. Prvky ktoré sa nachádzajú v materiáloch Zircalloy-4 a ZIRLO sú možné vidieť v tabulkách Tab. 3-1. a Tab. 3-2. Zliatina Zirlo sa používa aj pri palive VVANTAGE 6. Ich výrobcom je americká spoločnosť Westinghouse. Nové zliatiny sú optimalizované pre vysoké stupne vyhorenia a životnosti predlžujúcej prevádzkovú dobu v jadrových elektrárnach. [17]

Tab. 3-1 Prvky s obsahom ktoré tvoria zliatinu Zircalloy – 4

Prvok	Sn	Fe	Cr
Obsah (%)	1,5	0,2	0,1

Tab. 3-2 Prvky s obsahom ktoré tvoria zliatinu ZIRLO

Prvok	Sn	Fe	Nb
Obsah (%)	0,9-1,3	0,8-1,4	0,8-1,4

3.3.1.2 Zliatiny zirkónia pre VVER

Zliatiny zirkónia s nióбом sa používajú ako pokrytie palivových súborov VVER a RBMK. V Ruskej federácii sa vyvinul zliatinový typ Ozhenit-0,5 (0,25 Sn, 0,1 Fe, 0,1 Nb, 0,1 Ni) s nízkym zlučovaním. Táto zliatina je svojimi mechanickými vlastnosťami blízko k zliatine Zircalloy a môže sa používať vo vode a pare pri teplotách do 400 ° C. Zliatina Zr + 1% Nb typu N-1 (E-110) sa používa na opláštenie palivových článkov, zliatina Zr + 2,5% Nb typu N-2,5 (E-125) sa používa na rúrky montážnych kanálov. Základnou zložkou zliatiny Zr + 1% Nb je zirkónium s nasledujúcim obsahom ďalších prvkov (%):

Tab. 3-3 Prvky s obsahom ktoré tvoria zliatinu Zr + 1% Nb

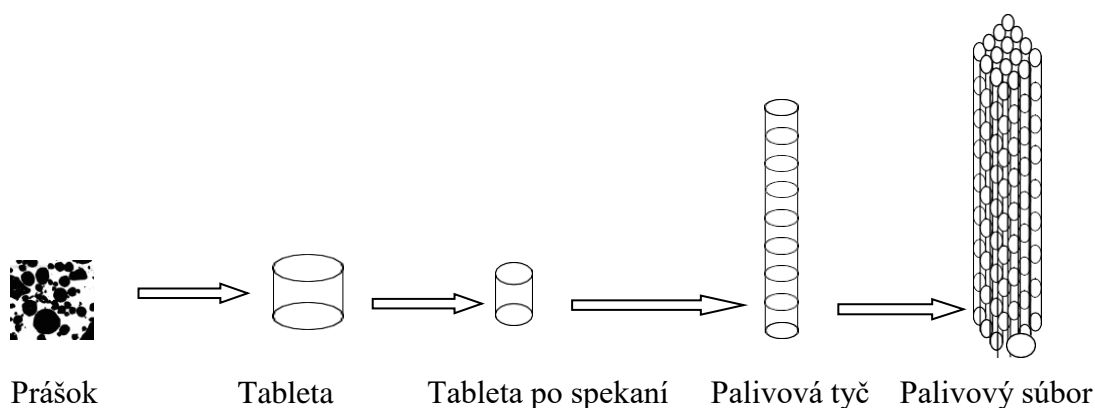
Prvok	Nb	Fe	Ni	Al	C	O
Obsah (%)	0,9-1,1	0,015	0,007	0,004	0,02	0,05

V poslednom čase bola zavedená séria nových variant E-110, ako napríklad E-110K alebo E-110G. [17]

3.4 Palivový súbor

Ak už to bolo písané, najväčší rozdiel medzi palivovým súborom východného a západného typu je ich tvar. Pri východnom type reaktore VVER je používaný hexagonálny (šesťuhlový) tvar Obr. 2-6. a pri západnom type reaktora PWR sa používa štvorcový tvar Obr. 2-5.

Palivový súbor (=palivový článok, kazeta) je vytvorený z veľkého počtu valcových palivových tyčí. Celý proces fabrikácie je možné vidieť na obrázku Obr. 3-2. Medzi jednotlivými tyčami prúdi voda. Dištančnú mriežku upevňujú jednotlivé tyče. Jednotlivé typy palivových súborov sa líšia v tom, že obsahujú iný počet tyčí. Palivové súbory pri elektrárni typu PWR sú bez obálkovej. [1]



Obr. 3-2 Znáznornenie procesu fabrikácie jadrového paliva [15]

3.4.1 Palivový súbor pre reaktory VVER

Medzi najznámejšími palivovými súbormi pre reaktory typu VVER patria súbory TVSA-T od spoločnosti TVEL a VVANTAGE 6 od spoločnosti Westinghouse.

Palivový typ TVSA-T vyrába Ruská spoločnosť TVEL pre reaktory VVER-1000. TVSA-T je vylepšená verzia palivového súboru TVSA. Spoločnosť vylepšila spoľahlivosť a tak nové súbory sú už odolnejšie proti deformácii. V palivovom súbore TVSA-T je možné nájsť dva typy palivových tyčí, a to tvel a tveg. S menom tvel sú označene klasické palivové tyče ktoré obsahujú len pelety s UO_2 . Označenie tveg znamená, že daná palivová tyč obsahuje palivové tabletky UO_2 s vyhorevajúcim absorbátorom – viz. Kapitolu 3.6. Ako materiál pokrytia bol používaný $\text{Zr}+1\%\text{Nb}$ ktorý má šírku 0.65 mm.–viz kapitolu 3.3. [9]

Vybrané údaje palivového súboru TVSA-T sa nachádzajú v tabuľke:

Tab. 3-4 Vybrané parametre palivového súboru TVSA-T

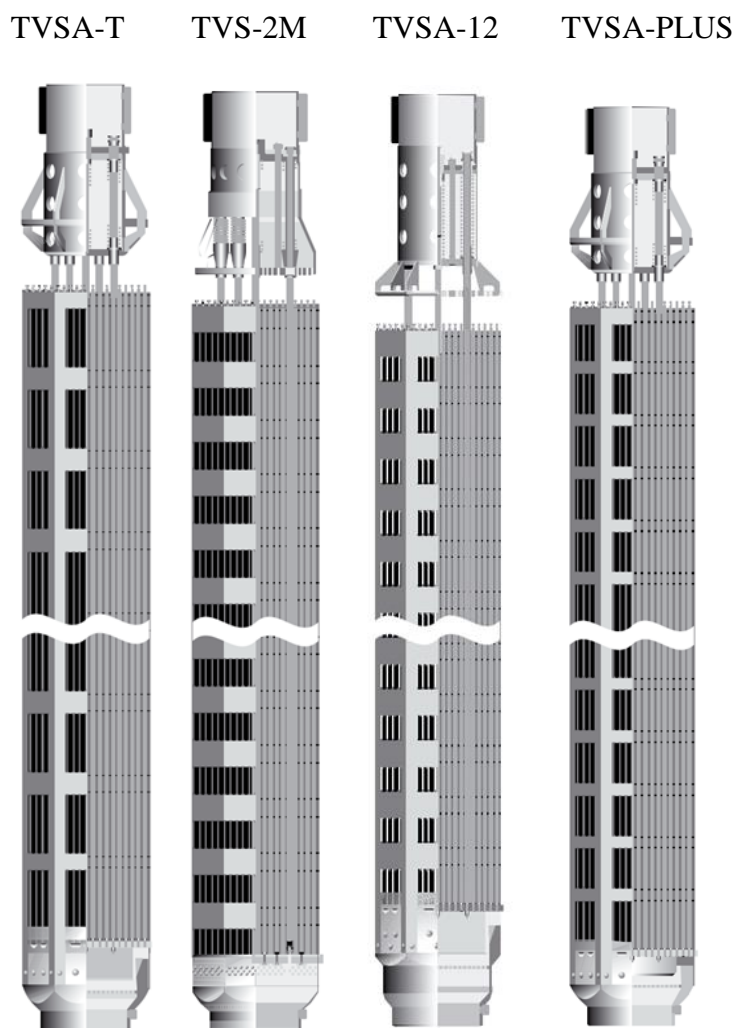
Celkový počet tyče	331
z toho plnené	312
z toho neplnené	19
Celková výška tyče (mm)	3915
Celková šírka tyče (mm)	9,1
Výška pelety (mm)	9
Šírka pelety (mm)	7,6
Hustota pelety (g/cm ³)	10,5

Palivový súbor TVSA-T je bez obáľkový, hexagonálny (šesťuholníkový) súbor. Ak v tabuľke Tab. 3-4 je znázornená, obsahuje 331 palivových tyčí z ktorých je iba 312 plnených palivom. Zostávajúce tyče slúžia na reguláciu (18) a jedna ktorá sa nachádza v centre sa používa pre meranie. V centrálnej trubke sa môžu umiestniť detektory.

Po vytvorení palivového súboru TVSA-T nasledovali novšie verzie a to: TVS-2M, TVSA-12 a TVSA-PLUS. Rozdiely v parametroch medzi jednotlivými súbormi sa nachádzajú v tabuľke Tab. 3-5. a ich grafické porovnanie je možné vidieť na obrázku Obr. 3-3.

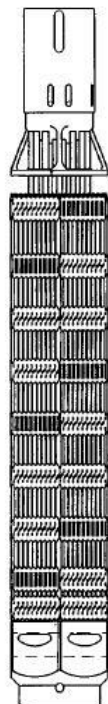
Tab. 3-5 Rozdiely v parametroch medzi súbormi TVSA [9]

Meno	TVSA-T	TVSA-2M	TVSA-12	TVSA-PLUS
Výška palivovej tyče (mm)	3925	3988	3836	3988
Hrúbka pelety (mm)	7,6	7,6	7,8	7,6
Centrálny otvor v peletách	1,2	1,2	0	1,2
Obsah UO ₂ (kg)	525	525	545	525
Hrúbka pokrytia (mm)	0,65	0,65	0,65	0,5
Vyhorenie paliva (MWd/kgU)	58	58	55	58



Obr. 3-3 Grafické porovnanie paliva TVSA [9]

Palivový typ VVANTAGE 6 vyrába spoločnosť Westinghouse pre jadrove elektrárne typu VVER. Sú vyrábané tak, aby palivo mohlo spolupracovať s palivom tvel v reaktore. Prvá verzia bola T1, potom postupne nasledovali ďalšie ako T2, Phase 0 a Phase 1X. Do roku 2010 tieto typy paliva boli používané aj v jadrovej elektrárni Temelín. Ako materiál pokrytia bol najprv používaný Zircaloy-4, ale pri type Phase 1X už používali ZIRLO. Rozdiely medzi jednotlivými pokrytiami sa nachádzajú v podkapitole 3.3.



Obr. 3-4 Palivový súbor Phase 1X [10]

3.4.2 Palivový súbor pre reaktory PWR

Palivové tyče v palivových súboroch typu PWR sú umiestnené do štvorcovej mriežky. Menšie súbory obsahujú 196 tyčí a tie sú v usporiadaní 14 x 14, väčšie 289 tyčí v usporiadaní 17 x 17. Najznámejšie palivové súbory sú AFA 3G od spoločnosti Framatome a RFA (Robust Fuel Assembly) od spoločnosti Westinghouse. Vybrané parametre súboru RFA sa nachádzajú v tabuľke Tab. 3-6, z ktorej vyplýva že palivové tyče sú dlhšie ako pri súboroch vo VVER. [11]

Tab. 3-6 Vybrané parametre paliva RFA

	RFA
Výška palivovej tyče (mm)	4200
Hrúbka tyče (mm)	9,5
Hrúbka pokrytia (mm)	0,7



Obr. 3-5 Palivový súbor pre PWR [12]

3.5 Výmena paliva

Z výroby je čerstvé palivo privezené do elektrárne, kde je skladované do doby jeho zavezenia do reaktora. Po prevezení do aktívnej zóny reaktora sú kazety aktívne po dobu 3-6 rokov. Dĺžka cyklu závisí od vyhorenia paliva a od typu reaktora. Počas tejto fázy sa určité množstvo atómov štiepi a energia získaná zo štiepnej reakcie sa ďalej využíva na výrobu elektrickej energie. Niektoré palivové kazety sú aj po vyvezení z aktívnej zóny schopné vytvoriť množstvo tepla, až 100kW kvôli rozpadu štiepných produktov v palive. Kvôli tomu sú vyvezené kazety v skladových bazénoch umiestnené na najčastejšie 3 roky, lebo rádioaktivita klesá s časom exponenciálne. Aby sa zabránilo žiareniu sú bazény plnené vodou minimálne dva metre. [15]

Výmeny paliva môžeme rozdeliť na dva spôsoby:

- Kampaňovitý spôsob
- Kontinuálny spôsob

Palivové cykly je možné rozdeliť na jednotlivé kampane (=častí). Každá z nich trvá 9-18 mesiacov. Po skončení jednotlivých kampaní nasleduje plánovaná odstávka reaktora. V odstávke je možnosť vyhorené palivo vyviezť z reaktora a nahradiť ho čerstvými palivovými kazetami. Kvôli získaniu najefektívnejšieho výkonu, pri výmene sa zmenia miesta starých kaziet v aktívnej zóne. Kampaňovitý spôsob je charakteristický pre reaktory VVER, PWR a BWR. [15]

Pri kontinuálnom spôsobe pri výmene palivových kaziet nie je žiadaná odstávka reaktora. Nové palivové kazety sú zavázané horizontálne a vyhorené kazety sú vytlačené von. Reaktory, ktoré používajú túto metódu musia mať špeciálny kanál pre vyvážanie a zavážanie paliva, tento špeciálny kanál zvyšuje náklady. Tento spôsob je charakteristický pre reaktory AGR, RBMK a CANDU. [14] , [15]

Pre vkladanie paliva sa používajú dve metódy:

Metóda : in-out – čerstvé palivové kazety sa vkladajú do stredu aktívnej zóny

-požívajú sa pre 5-6 ročné palivové cykly

Metóda : out –in - čerstvé palivové kazety sa dajú na kraj aktívnej zóny – starý koncept

-používali sa pre 3 ročné palivové cykly [15]

3.6 Efektívnosť paliva

Efektívnosť paliva sa dá vyjadriť Vodo-uránovým pomerom : ω . $\omega = \frac{V_{mod}}{V_{UO_2}}$ pomer objemov moderátoru a paliva v reaktore. Optimálny pomer udáva maximálnu hodnotu multiplikačného koeficienta K_{ef} . Hodnotu pomeru udáva aj bezpečnosť paliva. Palivo východného typu, vyrobeného v Rusku má neoptimálny (=podoptimálny) pomer, lebo tepelný koeficient má zápornú hodnotu. To vedie k nižšej miere výkonu a tak k horšej využiteľnosti paliva. Výhodou tohto typu paliva je, že zvyšuje bezpečnosť elektrárni v podkritickom a kritickom stave.

Paliva od západných výrobcov majú kladné hodnoty tepelného koeficientu. Tým zlepšujú prevádzku na úkor bezpečnosti.

Cieľom spoločnosti je dosiahnuť čím ekonomickejšiu prevádzku. To je možné dosiahnuť so zvýšením vyhorením paliva, s predĺžením palivových kampani a s lepším využitím paliva. Ale z jednej strany pre dosiahnutie vysokých hodnôt vyhorenia paliva je nutné palivo používať pri kratších kampaniach, na druhú stranu pre zvýšenie využitia paliva je výhodnejšie používať čím dlhšie kampane. Riešením tejto dilemy sa stalo používanie vyhorievajúcich absorbátorov. Vyhorievajúce absorbátory sú izotopy s veľkým účinným prierezom na absorpciu neutrónov, ktoré po absorpcii neutrónov menia na izotopy s veľmi malým účinným prierezom pre neutróny. Medzi najvýhodnejšími absorbátormi patrí Gadolínium so svojimi izotopmi ^{155}Gd a ^{157}Gd . Gadolínium takmer úplne vyhorí počas prvej kampane a nemení sa na iný prvok. Vznikajú nové izotopy ^{156}Gd a ^{158}Gd . Najčastejšie sa používa vo forme Gd_2O_3 a dodáva sa priamo do palivovej tyče.

Výhody využitia absorbátorov:

- riešia prebytok reaktivity pri skladovaní čerstvého paliva,
- umožňujú použiť väčšie množstvo štiepneho materiálu v kazete,
- umožňujú predĺžiť kampaň na 18 mesiacov – v tomto prípade je koncentrácia Gd je 6-8%. [16], [20], [21]

3.7 Vývoj paliva

Vývoj jadrového paliva prechádzal niekoľkým generáciám, ktoré sú nasledujúce:

3.7.1 Palivo prvej generácie

Palivo prvej generácie môžeme rozdeliť na neprofilované a na profilované jadrové palivo.

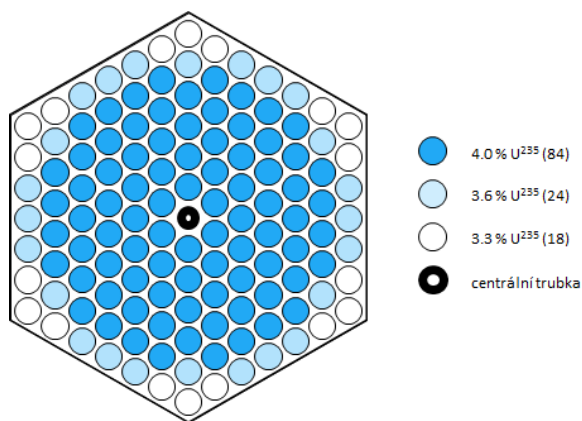
V tabuľke Tab. 3-7. sa nachádzajú údaje o jednotlivých palivách prvej generácie.

Tab. 3-7 Porovnanie vlastností profilovaného a neprofilovaného paliva

	Neprofilované	Profilované
Rovnaké obohatenie uránu vo všetkých tyčiach	Áno	Nie
Rovnomernosť vyhorenia	Nie	Áno
Miera obohatenie	3,60%	3,82%
Dĺžka palivového cyklu	3 roky	4 roky
Priemerný centrálny otvor	1,4-1,6 mm	1,4-1,6 mm
Materiál distančných mriežok	oceľ	zirkónium

Spoločné znaky paliva prvej generácie boli nasledujúce:

- Výška paliva v palivovej kazete: 2420 mm
- Počet zavázaných kaziet: 116-78
- Tlak hélia vo vnútri tyče: 107 – 147 kPa [20][21]



Obr. 3-6 Schéma paliva 1. generácie s priemerným obohatením 3,82% [21]

3.7.2 Palivo druhej generácie

Problémy prvej generácie paliva sa snažil riešiť palivo druhej generácie.

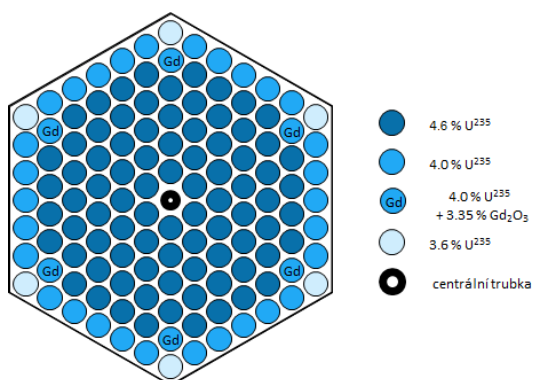
Optimalizovali pomeru voda/urán a to tak, že zvýšili hmotnosť uránu v palivovej kazete o 6,1 kg a zmenili konštrukcie. Hmotnosť uránu sa mohla zvyšovať tým, že sa zvýšil palivový stĺpec o 60 mm, zväčšil sa vonkajší priemer tabletky o 0,03mm a zmenšil sa centrálny otvor o 0,2 mm.

Pri konštrukcii zaviedli zmeny v priemeroch povlaku prútika – zmenšili o 0,04mm- v rozstupoch medzi prútikmi –zväčšili o 0,1 mm a v rozstupoch dištančných mriežok.

Pre získanie lepšieho vedenie tepla v medzere paliva a zníženie uvoľňovania štiepných produktov z tabletky zvýšili tlak hélia vo vnútri palivových prútikov na 500-700kPa. Nakoniec upevnili prútiky pružnou koncovkou. [20] , [21]

3.7.2.1 Palivo Gd-1

Pri tomto type je palivo obohatené priemerne na 4,38%. K palivu pridali vyhorievajúci absorbátor Gd_2O_3 . Tento typ sa používa na 5 ročný palivový cyklus. Počet zavážaných kaziet je 72. Absorbátor sa nachádza v tabletách šesť palivovej tyče ako to je možné vidieť na Obr. 3-7. [20], [21]



Obr. 3-7 Schéma paliva Gd-1 obohatenie ^{235}U 4,38% [21]

3.7.2.2 Palivo Gd-2

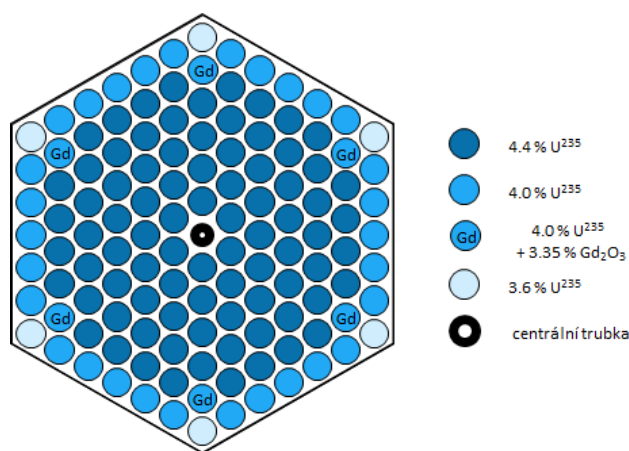
Pri palivovom type Gd-2 boli inovácie nasledujúce:

- Predĺženie palivového stĺpca o 60mm
- Vylepšenie vodo-uránového pomeru
- Priemerne obohatenie ^{235}U je 4,25%
- Zmenšenie rozstupov medzi tyčami a zmenšenie centrálného otvoru

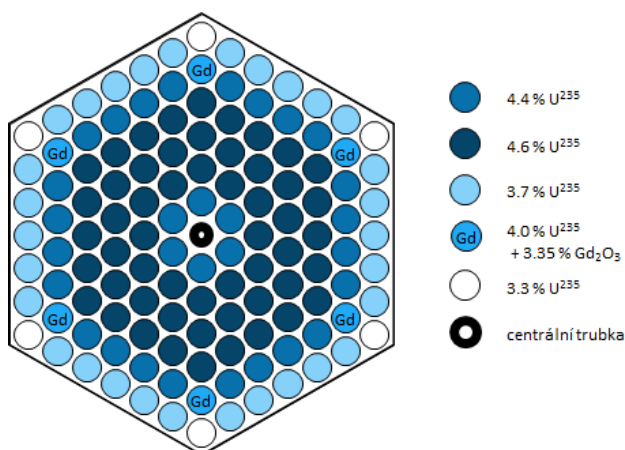
Hlavným cieľom vynášania paliva Gd-2 bolo predĺženie palivového cyklu na 5 rokov.

Pri dodržiavaní 5 ročného cyklu, ale aj pri dosiahnutí väčšieho výkonu prepracovali palivo Gd-2 a vzniklo Gd-2M ktorého schému je možné vidieť na Obr. 3-10. Je to vlastne konštrukčne podobné palivo ako Gd-2+, ktorého schému je možné vidieť na Obr. 3-9., ale je obohatené na úrovni 4,38% ako palivo Gd-1.

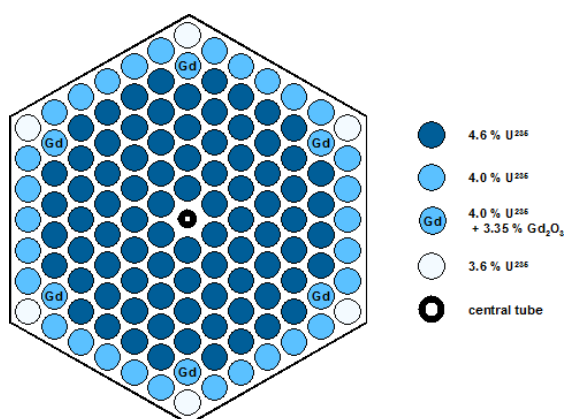
Najnovšia verzia paliva ktoré používa vyhoriavajúci absorbátor Gadolína je Gd-2M+. Palivo má rovnaké obohatenie ako Gd-1 , to znamená 4,38% ale sa skladá z peliet ktoré nemajú centrálny otvor, okrem peliet ktoré obsahujú absorbátor. [20], [21]



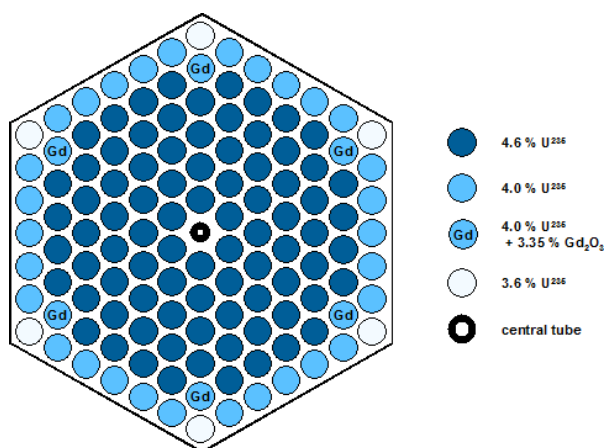
Obr. 3-8 Schéma paliva Gd-2 obohatenie ^{235}U 4,25% [21]



Obr. 3-9 Schéma paliva Gd-2+ obohatenie ^{235}U 4,38% [21]



Obr. 3-10 Schéma paliva Gd-2M, [21]

Obr. 3-11 Schéma paliva Gd-2M+ obohatenie ^{235}U 4,76% [21]

3.7.3 Palivo tretej generácie

V tretej generácii paliva bol ďalej zlepšovaný pomer voda/urán a to tak, že bolo dodávané väčšie množstvo vody. Bol vytvorený nový projekt s menom Slim Rod.

V novom type paliva boli zmenené:

- Vonkajšie priemery plášť a paliva
- Odstránili centrálny otvor v pelete
- Zmenili rozstup pri usporiadaní palivových tyčí.

Zmeny sa odzrkadlili v tom, že:

- mohli znižovať spotrebu na prírodný urán o 2-5%
- predĺžili kampane
- zvýšili výrobu energie [20][21]

Tab. 3-8 Základné rozdiely medzi palivom druhej a tretej generácie

Typ	Priemer vonkajšieho plášťa (mm)	Hrúbka plášťa paliva (mm)	Vnútorň priemer plášťa (mm)	Vonkajší priemer palivovej pelety (mm)	Priemer centrálného otvoru (mm)
Klasické	9,1	0,685	7,73	7,6	1,2
Slim Rod	8,9	0,585	7,73	7,6	0

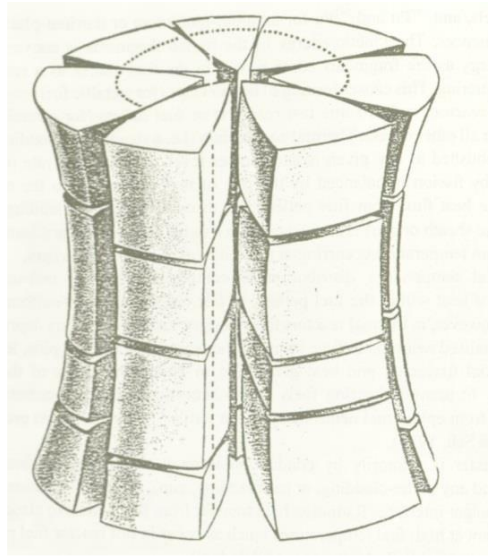
4 NÁROKY KLADENÉ NA JADROVÉ PALIVO

4.1 Deje v jadrovom palive

Počas štepnej reakcie nastane výmena tepla medzi pokrytím a palivom. Vysoká teplota má rôzne vplyvy na palivo a to nasledujúce:

4.1.1 Rozpínanie paliva

Tepelná rozťažnosť nastáva v okamihu, keď sa teplota paliva zvyšuje. Pretože palivové pelety majú výrazne vyššiu teplotu ako pokrytie, vedie rozdielna tepelná rozťažnosť medzi palivovými peletami a pokrytím k rozmerovým zmenám, ktoré majú tendenciu zaplniť medzery medzi obkladmi alebo obálkami. V prípade peliet z keramického paliva sa horúce stredné oblasti peliet rozťahujú viac ako vonkajšie chladnejšie oblasti, čo dáva peletám charakteristický tvar „presýpacích hodín“. Diferenčná tepelná rozťažnosť v palivových peletách tiež spôsobuje šmykové napätie, ktoré spôsobuje praskanie peliet. Výsledné fragmenty peliet sa môžu premiestniť do akejkoľvek medzery v obale peliet. [22]



Obr. 4-1 Schéma idealizovanej zdeformovanej palivovej pelety [22]

4.1.2 Zahusťovanie paliva

V prípade peliet z keramického paliva sú pri výrobe vynechané malé miesta približne 5%. Táto pórovitosť môže byť obsadená atómami plynov po štiepení. To vedie k zhusťovaniu paliva, čo má za následok, že medzera medzi pokrytím a palivom bude menšia. Menšia medzera spôsobuje zvýšenie teploty paliva. [22]

4.1.3 Rast palivového zrná

Počas fabrikácie paliet sa urán melie na prášok. Pri spekaní vznikajú zrná rôznej veľkosti. Keď počas štiepenia teplota dosiahne veľké hodnoty (viac ako 1200 °C), tak nastane zmena v zrnách. Malé zrná stratia svoj objem, ale u väčších, objem narastie. To spôsobuje že v pelete sa priemerná veľkosť zrn zvyšuje. [22]

4.1.4 Napúchanie objemu paliva (swelling)

Napúchanie palivovej pelety je spôsobené štepnými produktmi, ktoré po štepnej reakcii zostanú v palive. Napúchanie zhoršuje tepelnú vodivosť paliva. V prípade keď je napúchanie spôsobené pevnými štepnými produktmi, hovoríme o nezadržateľnom (inexorable) napúchaní, keď v palive zostanú plynné štepné produkty a spôsobujú napúchanie, hovoríme o plynnej (volatile) napúchaní. [22]

4.1.5 Tvrdenie, krehnutie a korózia pokrytie

Počas štepenia nastane interakcia medzi neutrónmi a pokrytím. Zrážky môžu spôsobiť poškodenie v kryštalickej mriežke kovov ktoré tvoria pokrytie. Poškodenie ožiarením sa prejaví ako tvrdnúce pokrytie, čo znižuje jeho elasticitu a spôsobuje jeho krehnutie.

Pokrytie počas celej prevádzky oxiduje pretože zirkónium vstupuje do interakcie s chladiacou vodou. Miera oxidácia súvisí od stavu paliva, lebo pri čerstvom palive je oxidácia malá, ale pri palive ktoré je vyhorevané vo veľkej miere je oxidácia značná. [22]

4.1.6 Vydúvanie pokrytia

Okolo pokrytia sa nachádza chladiaca voda pod vysokým tlakom, ale vo vnútri palivovej tyče medzi peletami a pokrytím je nízky tlak. Výsledkom rozdielov tlakov je namáhanie pokrytia, čo má za následok menšenie medzery medzi pokrytím a palivom. [22]

4.1.7 Mechanické interakcie medzi palivom a pokrytím

Predchádzajúce dva javy, napúčanie a vydúvanie spôsobujú zmenu v medzere medzi palivom a pokrytím. Vďaka tomu, že sa peleta nedoformuje symetricky ale počas štepenia dosiahne tvar presýpacích hodín, je napätie v najširších miestach najväčšie. Napätie v širších častiach pelety vedie k zväčšeniu napätia na rozhraní dvoch peliet, čo spôsobuje narážanie rohov peliet na pokrytie. Keď pokrytie a palivo sa dostanú do styku, sila ktorá je vyvolaná medzi nimi spôsobí deformáciu pokrytia. Pri normálnej prevádzke je táto sila malá, pretože je dostatok času na uvoľňovanie napätia. Pri rýchlom zvýšení výkonu teplotná rozťažnosť paliva narastá rýchlo a pôsobí veľkou silou. [22]

4.1.8 Chemické interakcie medzi palivom a pokrytím

Keď už nastala interakcia medzi palivom a pokrytím, tak začínajú aj chemické interakcie nielen mechanické. Interakcie môžu nastať medzi palivom a prítomným kyslíkom. Ich reakcia spôsobuje spojenie pokrytia a paliva.

Pri zmene výkonu reaktora môže nastať v pokrytí praskanie kvôli koróznemu tlaku. (stress-corrosion cracking). Toto praskanie vyvoláva predovšetkým jód, ktorý je prítomný kvôli štepeniu. [22]

4.1.9 Stenčovanie pokrytia - Korózia, erózie a rozpúšťanie pokrytia

Stenčovanie pokrytia delíme na tri časti:

- stenčovanie eróziou – vyvoláva omieľanie kovu prúdiacim chladičom
- stenčovanie koróziou – vyvoláva chemické interakcie medzi pokrytím a chladiacou vodou
- stenčovanie rozpúšťaním [22]

4.1.10 Únava pokrytia

Palivo je hermeticky zatvorené do palivovej tyče ako už to bolo spomenuté v kapitole 3. Keď palivo zotrvá dlhšiu dobu v reaktore tak nastane únava pokrytia. To znamená, že materiál pokrytia sa poškodí. Veľké poškodenie môžu spôsobovať aj stratu hermetičnosti pokrytia. [22]

4.2 Limitné podmienky prevádzkových režimov reaktora

Nasledujúca podkapitola je písaná na základe zdroja [5].

Prevádzka jadrových blokov je obmedzená niekoľkými limitmi a obmedzeniami platných pre reaktor a jednotlivé systémové technológie, stanovených pre zabezpečenie maximálnej bezpečnosti jadrového zariadenia. Pri prevádzke musí byť zaistené:

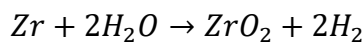
4.2.1 Podmienka netavenia uránového jadra v palivovej tyči

Dôvodom tohto obmedzenia je skutočnosť, že pri presiahnutí teploty tavenia nastáva prudká zmena objemu a tvaru palivovej tabletky, pri ktorej už nie je zaručená dostatočná tesnosť palivových tyčí. Pri najťažších haváriách kedy reaktor stráca svoje chladivo hrozí nebezpečenstvo, že palivo a pokrytie dosiahnu svoje teploty topenia.

Pri čerstvom palive je teplota topenia 2805 °C, ale s vyhorením sa táto hodnota znižuje.

4.2.2 Podmienka neprekročenia hraničnej teploty zirkóniového pokrytia

Pokrytie palivového prútika je vyrobená zo zliatiny zirkónia. Pri teplote nad 350 °C sa zirkóniová zliatina postupne stráca svoju pevnosť a tak zvyšuje pravdepodobnosť poruchy hermetičnosti palivovej tyče. Kritériom prijateľnosti maximálnej teploty pokrytia je 1200 °C k tejto teplote sa hypoteticky blížíme iba pri najťažších haváriách keď reaktor stráca svoje chladivo. Keď nastane porucha s chladivom pri vysokých teplotách tak zirkóniove pokrytia reagujú s vodnou parou a vznikne vodík.



4.2.3 Podmienka neprevyšovania váhového množstva pary na výstupe z palivového súboru

Z hydraulických charakteristík paralelných palivových súborov v aktívnej zóne vyplýva, že keď sa zvyšuje obsah pary v prúd chladiva, tak s tým sa zvyšuje hydraulický odpor kanálu, čo spôsobuje znižovanie prietoku chladiva a prehrievanie v palivových tyčiach.

4.2.4 Podmienka nepriepustnosti kríza varu

Táto podmienka priamo súvisí s požiadavkou na udržanie dostatočne vysokého súčiniteľa na prestupe tepla. Vysoká teplota v palivovom súbore môže spôsobiť nerovnomerné chladenie, lebo sa mení súčiniteľ prestupu tepla a s tým sa zhoršuje odvádzanie akumulovaného tepla.

Tieto obmedzenia musia byť dodržané aj v obvyklých, prechodových a poruchových režimoch. Toho je možné dosiahnuť udržiavaním korelácie medzi vývinom a odvodom tepla z reaktora v bezpečných medziach alebo v prípade nemožnosti udržania tejto korelácie, včasným odstavením reaktora. V prípade odstavenia reaktora, popísane požiadavky je však stále potrebné splniť s ohľadom na zbytkový výkon aktívnej zóny.

5 TRENDY VO VÝVOJI JADROVÉHO PALIVA

Accident tolerant fuel (ATF- Palivo odolné proti nehodám) je výraz používaný na opis nových technológií, ktoré zvyšujú bezpečnosť a výkonnosť jadrového paliva. ATF môže zahŕňať použitie nových materiálov a vzorov pre pokrytia a palivovej pelety. Framatome, GE / GNF a Westinghouse vyvíjajú koncepcie ATF pomocou financovania z amerického ministerstva energetiky (DOE – Department of Energy). Ich cieľom je vyvinúť nové pokrytie a palivové materiály, ktoré dokážu lepšie tolerovať stratu aktívneho chladenia v jadre pri súčasnom zachovaní alebo zlepšení výkonu a hospodárnosti paliva počas normálnej prevádzky. Prioritou programu EATF je minimalizovať tvorbu vodíka. [23]

5.1 Spoločnosť Westinghouse

Spoločnosť Westinghouse v júni 2017 uviedla na trh svoj ATC EnCore. V septembri 2019 vyrábali prvé testovacie tyče EnCore s ich vložením do skúšobnej zostavy v septembri 2019 v závode spoločnosti Exelon v Byrone. Počiatočné palivo EnCore obsahuje pelety silicidu uránu s vysokou hustotou vo vnútri zirkóniového opláštenia s tenkou vrstvou chrómu, čo ho robí chemicky odolnejším. (Palivá na báze silicidu uránu - U_3Si_2 - vyvíjané aj pre výskumné reaktory sa vyvíjajú aj v INL.) V druhej fáze by palivové pelety na báze silicidu uránu boli v kompozitnom opláštení z karbidu kremíka s keramickou matricou s teplotou topenia 2800°C a tieto skúšobné zostavy by sa mohli do reaktora vložiť do roku 2022. Westinghouse uviedli, že dôjde k úsporám nákladov, pretože silicid uránu ponúka až o 17% vyššiu hustotu uránu a oveľa vyššiu tepelnú vodivosť, ktorá sa pri ožarovaní, ako je napríklad UO_2 , nedegraduje, takže počas výmeny netreba vymeniť tak veľa súborov. [23]

U_3Si_2 je pokročilá forma paliva s vysokou hustotou uránu so zlepšenými termofyzikálnymi vlastnosťami v porovnaní s tradičnou palivovou formou UO_2 . Palivo U_3Si_2 poskytuje 17% zvýšenie hustoty U^{235} , zatiaľ čo zostáva pod 5% obohatenia U^{235} . Okrem toho poskytuje 2 až 5-násobné zvýšenie tepelnej vodivosti, čo významne zvyšuje odolnosť tohto paliva voči tavenine v línii počas problému s prechodným výkonom, aj keď jeho teplota topenia je $1665^\circ C$. Počas nehôd tiež významne znižuje akumulovanú energiu v palive a znižuje najvyššiu teplotu pri strate chladiacej kvapaliny (LOCA).

Jednou zo slabých stránok paliva U_3Si_2 je odolnosť proti korózii spôsobenej vodnou parou. Ak je palivo U_3Si_2 vystavené vode a / alebo pare pomocou metódy termogravimetrickej analýzy (TA) a simulovaných testov v autokláve pri teplotách vyšších ako $300^\circ C$, oxiduje rýchlejšie ako UO_2 a môže viesť k vyššej rýchlosti vymývania paliva. Aby sa zmiernil problém s vymývaním paliva pri nepravdepodobných udalostiach, ako je napríklad presakovanie tyče, palivové pelety U_3Si_2 sa umiestnia do krátkych segmentov tak, aby sa výrazne znížilo celkové množstvo vymytého paliva. Pri konštrukcii segmentovej tyčinky pelet U_3Si_2 zníži, aby sa zmiernila objemová expanzia peliet v dôsledku oxidácie v prípade priestupníka. [24]

5.2 Spoločnosť Framatome

Spoločnosť Framatome vo fáze 2 svojho ATF programu PROtect s vylepšeným od roku 2017 vyvíja koncepciu jadrového paliva pomocou chrómom potiahnutej zliatiny zirkónia (M5) kombinovanej s palivovými peletami dotovanými chrómom. Očakáva sa, že palivo udrží lepšie plynné produkty štepenia a zlepši interakciu s plátovaním peliet a plášť bude lepšie odolávať oxidácii pri vysokých teplotách. Dištančná mriežka GAIA, ktorá drží palivové tyče, má tiež vysokú mechanickú odolnosť proti praženiu. V júni 2018 DOE oznámila testovanie Framatomeho ATF v reaktore Advanced Test Reactor v Národnom laboratóriu v Idahu. Prvé kompletné testovacie súbory tohto paliva GAIA s plášťom M5 a peletami so zvýšeným obsahom chrómu boli naložené do Vogtle 2 spoločnosti Southern Nuclear's v marci 2019. Exelon plánuje naloženie dvoch úplných palivových súborov GAIA do Calvert Cliffs 2 v marci 2021. [23]

V materiály M5 je hlavným prvkom zirkónium, ale tento materiál už neobsahuje cín v porovnaní s materiálom ZIRLO a Zircaloy-4. Najväčšou výhodou materiálu je, že má extrémne nízky príjem vodíka. Kým príjem vodíka u materiálu Zircaloy – 4 pri vyhorení 60 000 MWd/tU je okolo 500 ppm, táto hodnota u materiálu M5 pohybuje medzi 50 až 100 ppm. Hlavným zlučovacím prvkom je niób. Ďalšie prvky sa nachádzajú v tabuľke Tab. 5-1. [18]

Tab. 5-1 Prvky s obsahom ktoré tvoria zliatinu M5

Prvok	Nb	O	S
Obsah (%)	1	0,13	0,001

5.3 Spoločnosť Rosatom

Palivová spoločnosť Rosatom TVEL vyvíja ATF pre použitie v reaktoroch VVER Rosatom a v západných PWR. Na počiatkové testy sa vyrábali palivové pelety z oxidu uraničitého, ako aj zliatiny uránu a molybdénu, ktoré majú vyššiu hustotu a tepelnú vodivosť. Po ožiarení sa niekoľko palivových tyčí z každého palivového súboru odstráni pre štúdie po ožiarení a nahradí sa s novými palivovými tyčami s rôznymi kombináciami obalového materiálu a materiálov z palivových peliet na ďalšie testy. Koncom roku 2019 Rosatom oznámila, že tri TVS-2M palivové súbory, z ktorých každá obsahovala dvanásť palivových tyčí ATF, boli vyrobené v továrni na chemické koncentráty Novosibirsk spoločnosti TVEL. Súbory sa plánujú naložiť do jedného z reaktorov VVER-1000 v Rostove začiatkom roku 2020. Palivové tyče ATF obsahujú pelety oxidu uraničitého s plášťom zloženým buď zliatiny zirkónia s chrómovým povlakom alebo zliatiny chrómu a niklu. Obe možnosti zvyšujú tepelnú odolnosť plášťov. Do úvahy sa berú zdokonalené materiály a komponenty jadra, najmä inovatívne materiály plášťa (potiahnuté a vylepšené zliatiny na báze Zr, kompozity SiC, pokrokové ocele a žiaruvzdorné kovy) a nepalivové komponenty (pokročilé riadiace tyče, kanálová krabica BWR). Podskupina sa zameriava na návrh paliva s cieľom osloviť 2 kategórie inovatívnych palív: vylepšené UO₂, palivá s vysokou hustotou a palivá s obsahom častíc. [23]

V Haldenovom reaktore sa uskutočnili vnútro-reaktorové testy, kde otestovali rôzne typy pokrytia od spoločnosti Rosatom. Výsledky ukazujú, že:

Najlepšia odolnosť proti korózii a hydrogenácii, ale najhoršia odolnosť proti tečeniu na oplášteniach palivových tyčí zo zliatiny E125 bolo pozorované ožiarenie. Najhoršia odolnosť proti korózii a hydrogenácii s najlepšou odolnosťou proti predĺženiu pri ožiarení bolo pozorované na pokrytie palivových tyčí vyrobených zo zliatiny E635.

Optimálna kombinácia korózných, hydrogenačných a elongačných odporov v reaktore bol pozorovaný v plášťoch palivových tyčí zo zliatiny E110opt a E110M. Zliatina E110M má zároveň lepšiu odolnosť proti ožiareniu pri opláštení plášťa v porovnaní so zliatinou E110opt s prakticky podobnou odolnosťou proti korózii.

Modifikácie zliatiny E635opt a E635M preukázali vyššiu odolnosť proti korózii a zachytávaniu vodíka v porovnaní so zliatinou E635 pri zachovaní vysokej pevnosti a ťažnosti. Tieto úpravy potvrdili ich vyhliadky na použitie ako plášť palivových tyčí s vylepšenými vlastnosťami. Z týchto zliatin sa plánujú vyvíjať ešte lepšie, modernejšie zliatiny. [25]

5.4 Spoločnosť GE Hitachi s GNF

GE Hitachi s GNF vyvíja dva typy ATF: plášť z feritickej ocele (napr. Fe-Cr-Al) známy ako IronClad a potáhané zirkóniové pokrytie známy ako ARMOR. Obidve sú určené pre palivo UO₂ a sú navrhnuté tak, aby poskytovali odolnosť proti oxidácii a vynikajúce vlastnosti materiálu v celom rozsahu podmienok v BWR a PWR. Pokrytie Fe-Cr-Al IronClad má lepšiu mechanickú pevnosť pri vysokých teplotách, lepšie zadržiava štiepne plyny ako zliatina zirkónia a pri nehode má menší potenciál na výrobu vodíka.

Pokrytie zirkóniom potiahnuté ARMOR poskytuje zvýšenú ochranu palivových tyčí. [23]

6 ZÁVER

Bakalárska práca sa zaoberá teóriou jadrovej elektrárne chladenej tlakovou vodou. Podľa odborných literatúr opisuje rozdiely medzi jadrovými elektrárnami východného a západného typu.

V kapitole 3 charakterizuje jednotlivé zliatiny ktoré sú používané na pokrytie palivových súborov a palivových tyčí a to hlavne pre jadrové elektrárne s reaktormi chladené tlakovou vodou. Stručne opisuje jednotlivé časti výroby jadrového paliva, od ťažby až do zavedenia palivových súborov do reaktora.

V kapitole 4 popisuje limitné podmienky, ktoré sú pre bezpečnú prevádzku nevyhnutné pre zabránenie vzniku nehôd. Opisové deje počas štiepnej reakcie umožňujú lepšie pochopiť udalosti ktoré sa odohrávajú v peletách a v materiáli pokrytia.

Veľmi dôležité je aj nepretržitý vývoj palív aj v pokrytí, aby sa predišlo nehodám, ktoré sa už v minulosti vyskytli. Veľké spoločnosti a vlády sa musia urobiť všetko pre to, aby sa našli riešenia ponúkajúce najpriaznivejšie ekonomické a environmentálne účinky. V kapitole 5 sa nachádza zoznam, čím sa zaoberajú jednotlivé veľké jadrové spoločnosti. Program spoločnosti Westinghouse môže zabezpečiť aby prípadné nehody nemali taký obrovský negatívny vplyv na životné prostredie ako v minulosti. Bezpečnosť zaisťujú aj nové materiály pokrytia ako napríklad E635, ktorého sa stále vyvíja spoločnosť Rosatom, aby odolnosť proti korozii bola ešte lepšia. Nepretržitý vývoj zabezpečí zníženie nákladov v budúcnosti na výrobu určitého množstva energie. Čo môže mať za následok vhodné ekonomické a enviromentálne dopady.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] RAČEK, Jiří. *Jaderné elektrárny*. Brno, 2002. ISBN 80-214-2158-4.
- [2] RAČEK, Jiří. *Jaderná zařízení*. Druhé. Brno: Novpress s.r.o , Brno, 2013. ISBN 978-80-214-4745-5.
- [3] ŠTAMBERG, Karel. *Technologie jaderných paliv I*. Druhé. Praha: ČVUT, 2006. ISBN 08-01-03479-8.
- [4] *Z čeho sa skladá reaktor* [online]. [cit. 2020-01-07]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/reaktor_2.html
- [5] HEZOUČKÝ, František a Svatobor ŠTECH. *Základy teorie normálních a abnormálních provozních režimů energetických bloků s tlakovodními reaktory*. Dolní Životice: OPTYS, spol., 2015. ISBN 978-80-261-0548-0.
- [6] HONG, Liem Peng. [online]. In: . [cit. 2020-01-07]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/PWR-NEACRP-core-model-of-case-C-8_fig2_305151956
- [7] MUKUNTH, Vasudevan. Behind the scenes at Kudankulam. *The Hindu* [online]. [cit. 2020-01-07]. Dostupné z: <https://www.thehindu.com/opinion/blogs/blogs-the-copernican/article4692062.ece>
- [8] DUBŠEK, František. *Základy teorie a stavby jaderných reaktorů*. Brno: Rektorát VUT v Brně, 1990. ISBN 80-214-0077-3.
- [9] TVEL JSC. Nuclear fuel for VVER reactors. On the WWW, - 2011. PDF file. URL: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/37/098/37098302.pdf>
- [10] BEČVÁŘ, Josef. *Jaderné elektrárny*. Druhé. Praha: SNTL, 1981.
- [11] RUDLING, Peter, Charles PATTERSON, Ron ADAMSON a Friedrich GARZAROLI. *Annual Report* [online]. 2012 [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: https://www.antinternational.com/docs/samples/FM/10/ZIRAT17_AR_sample.pdf
- [12] *Nuclear Fuel* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/nuclear-fuel/>
- [13] GLASSTONE, Samuel a Alexander SESONSKE. *Nuclear reactor engineering: Reactor design basics*. štvrtý. Berlin: Springer-Science+Business Media, B.V., 1994. ISBN 978-1-4899-5753-5.
- [14] SLUGEN, Vladimír. *Jadrový palivový cyklus*. Bratislava: Pedagogické vydavateľstvo DIDAKTIS, 2014. ISBN 978-80-8166-001-6.
- [15] SLUGEN, Vladimír. *Analýza prednej a zadnej časti jadrového palivového cyklu* [online]. Bratislava, 2009 [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <http://docplayer.net/35423882-Analyza-prednej-a-zadnej-casti-jadroveho-palivoveho-cyklu-vladimir-slugen.html>
- [16] World Nuclear News. *Russia proposes new closed fuel cycle* [online]. [cit. 2020-05-15]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear-news.org/UF-Russia-proposes-new-closed-fuel-cycle-2309177>

- [17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Thermophysical Properties of Materials For Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data*. Vienna: IAEA, 2008. ISBN 978–92–0–106508–7.
- [18] AREVA INC. Advanced Cladding and Structural Material M5. PDF file. URL: https://www.framatome.com/us_platform/liblocal/docs/Catalog/PWR/ANP_U_037_V7_14_ENG_M5.pdf [cit. 2020-06-05]. 8–92–0–106508–7.
- [19] HÖGLUND, Jan, Carina ÖNNEBY a Ulf BENJAMINSSON. *Westinghouse VVER Fuel Development Programs* [online]. , 23 [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://docplayer.net/48422466-Westinghouse-vver-fuel-development-programs.html>
- [20] BURKET, Daneš. *Palivové vsázky se zdokonaleným palivem na Jaderné elektrárně Dukovany*. Praha, 2003. Dizertační práce. České Vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská.
- [21] BURKET, Daneš. Zkušenosti s palivem s vyhořívajícími absorbátory v jaderné elektrárně Dukovany. *Energetika*. 2006, č. 4. ISSN: 0375-8842.
- [22] ROSSITER, Glyn. *Understanding and modelling fuel behaviour under irradiation*. UK: Woodhead, 2012.
- [23] World Nuclear Association. *Nuclear Fuel and its Fabrication* [online]. [cit. 2020-06-08]. Dostupné z: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/conversion-enrichment-and-fabrication/fuel-fabrication.aspx>
- [24] SHAH, Hemant, Javier ROMERO, Peng XU, Robert OELRICH, Jorie WALTERS, Jonathan WRIGHT a William GASSMANN. *Westinghouse-Exelon EnCore® Fuel Lead Test Rod (LTR) Program including Coated cladding Development and Advanced Pellets* [online]. [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: <https://www.euronuclear.org/archiv/topfuel2018/fullpapers/TopFuel2018-A0145-fullpaper.pdf>
- [25] MARKELOV, V.A., V.V. NOVIKOV, N.S. SABUROV, A.YU. GUSEV a V.F. KOŇKOV. *IRRADIATION TEST UNDER ADVANCED PWR CONDITIONS IN THE HALDEN REACTOR AND POST-IRRADIATION EXAMINATION OF FUEL ROD CLADDINGS FROM DIFFERENT ZIRCONIUM ALLOYS* [online]. [cit. 2020-06-09]. Dostupné z: <https://www.euronuclear.org/archiv/topfuel2018/fullpapers/TopFuel2018-A0128-fullpaper.pdf>